

УДК 623.746: 629.7.083.003.13 (045)

Б.А.Ляшенко¹, д-р техн.наук, А.К.Скуратовський², канд.техн.наук,
О.В.Радько³, канд.техн.наук, А.В.Рутковський⁴, канд.техн.наук

1 - Інститут проблем міцності ім. Г.С.Писаренка НАН України, 2 – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",
3-Національна академія оборони України, 4 - Інститут проблем міцності ім. Г.С.Писаренка НАН України, м. Київ, Україна,

ВПЛИВ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ІОННОАЗОТОВАНОМУ ПОВЕРХНЕВОМУ ШАРІ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ СТАЛІ 30ХГСА

Исследованы остаточные напряжения в поверхностном слое стали 30ХГСА после импульсного газотермоциклического ионного азотирования. Определено влияние их величины на износостойкость обработанного материала. Установлено существование оптимального относительно износостойкости диапазона остаточных напряжений сжатия, который находится в пределах 650...850 МПа.

The residual stresses of 30ХГСА steel superficial layers after the impulsive gasthermocyclic ionic nitriding are explored. Influence of their size is set on the treated material wearproofness. The residual compressive stresses optimum in relation to wearproofness range existence is set, which is within the 650...850 MPa.

Вступ

Потреба у забезпеченні високого рівня експлуатаційних властивостей та надійності сучасної техніки робить актуальною задачу розробки нових та удосконалення існуючих методів модифікації поверхневого шару деталей машин та механізмів, активного впровадження прогресивних технологій у машинобудування.

Перспективним методом поверхневого зміцнення на сучасному етапі розвитку інженерії поверхні вважається удосконалений варіант іонного азотування (ІА) – імпульсне газотермоциклічне ІА (ГТЦ ІА), при якому поєднуються переваги використання пульсуючого струму високої напруги та газотермічних циклів насичення поверхневих шарів матеріалу азотом [1]. При цьому значно підвищується інтенсивність дифузійного насичення, скорочуються витрати електроенергії, реакційних газів, підвищується безпека та якість обробки деталей. Завдяки застосуванню даної технології значно підвищуються властивості оброблених деталей, зокрема зносостійкість та корозійна тривкість.

Однак, на сьогоднішній день недостатньо досліджено вплив структурно-фазового та хімічного складу і напруженого стану іоноазотованих шарів на експлуатаційні властивості оброблених матеріалів. Зокрема, відсутні дані щодо величин та розподілу залишкових напружень у зміцнених поверхневих шарах, їх впливу на таку важливу властивість конструкційного елементу, як зносостійкість.

В роботі [2] показано, що критерій залишкових напружень може бути використаний для прогнозування границі витривалості зміцнених деталей як при циклічному згинанні, так і в умовах розтягу-стиску. Автори [3] виявили, що твердість і показники зносостійкості залежать від варіантів розподілу залишкових напружень у поверхневих шарах. До того ж відомо, що загальні напруження в деталі є алгебраїчною

сумою залишкових та експлуатаційних напружень, тому врахування їх величини та знаку є надзвичайно важливим.

Постановка задачі

Метою даної роботи є дослідження впливу залишкових напружень, які виникають у поверхневих шарах сталі 30ХГСА після її обробки імпульсним ГТЦ ІА, на зносостійкість зміцнених деталей.

Методика досліджень

Для поверхневого зміцнення імпульсним ГТЦ ІА використовувались зразки розміром $5 \times 5 \times 10$ мм зі сталі 30ХГСА. Частина зразків зміцнювалася без попередньої термообробки (ТО), іншу було попередньо термооброблено – (гартування при $870 \dots 890^\circ\text{C}$ у оливі, відпускання при $510 \dots 570^\circ\text{C}$, твердість $37 \dots 38$ HRC). Для порівняльної оцінки зносостійкості частину зразків протягом 4 годин зміцнювали газовим азотуванням при температурі 540°C у середовищі $90\%\text{NH}_3 + 10\%\text{Ar}$.

Обробка імпульсним ГТЦ ІА здійснювалася на установці ВПА-1 [4] за наступними режимами: тиск реакційного газу $p = 50 \dots 250$ Па (через кожні 50 Па); температура процесу $T = 400 \dots 600^\circ\text{C}$ (через кожні 100°C); склад реакційного газу – $95\%\text{N}_2 + 5\%\text{C}_3\text{H}_8$; $90\%\text{N}_2 + 5\%\text{C}_3\text{H}_8 + 5\%\text{Ar}$; $80\%\text{N}_2 + 5\%\text{C}_3\text{H}_8 + 15\%\text{Ar}$; час обробки $t = 1,5 \dots 4$ години.

Триботехнічні властивості зміцнених шарів визначали на машині тертя [5] за наступних умов: мастильне середовище – мастило ЦІАТИМ-201 (ГОСТ 6267-74); питоме навантаження $P = 2,5 \dots 25$ МПа; швидкість ковзання $V = 0,4; 0,7; 1,0; 1,3$ м/с. Іонноазотовані зразки притискалися до термооброблених роликів-контртіл діаметром 40 мм зі сталі 30ХГСА. Контакт пари тертя відбувався за схемою «диск-колодка». Шорсткість поверхонь зразків (залежно від режиму обробки) становила $R_a = 0,27 \dots 0,45$ мкм, а роликів-контр тіл – $R_a = 0,53$ мкм. Для порівняльної оцінки зносостійкості матеріалів розраховували вагову інтенсивність зношування K_v [кг/см² на 1000 м шляху тертя] як відношення вагового зношування, що відбулося на шляху тертя 1000 м, до площі контакту. Вагове зношування визначалося як різниця у вазі зразка до та після випробувань. Зважування проводилося на лабораторних аналітичних терезах ВЛР-200. Перед зважуванням зразки промивали бензином Б-70 (ГОСТ 1012-72) та просушували.

Прецизійне вимірювання макронапружень в іонноазотованих шарах проводилося на дифрактометрі ДРОН-4-13С із використанням $\text{Fe}_{K\alpha 1}$ - випромінювання. Зйомка проводилася за методом Брега-Брентано. Залишкові макронапруження визначалися за допомогою $\sin^2 \psi$ -методу (багатократних зйомок) [6, 7]. Глибина проникнення рентгенівського випромінювання складала $10 \dots 15$ мкм.

Результати досліджень та їх обговорення

Проведені дослідження залишкових напружень показали, що азотованим шарам притаманні залишкові напруження стиску, які є наслідком збільшення концентрації зв'язаного азоту. Рівень і розподіл напружень залежать від технологічних параметрів процесу формування дифузійного зміцненого шару, а також від попередньої термообробки.

Результати дослідження залишкових напружень у іонноазотованих шарах зміцнених зразків наведені на рис. 1 та 2. На епюрах залишкових напружень можна спостерігати, зменшуються від максимального значення на поверхні до нульових

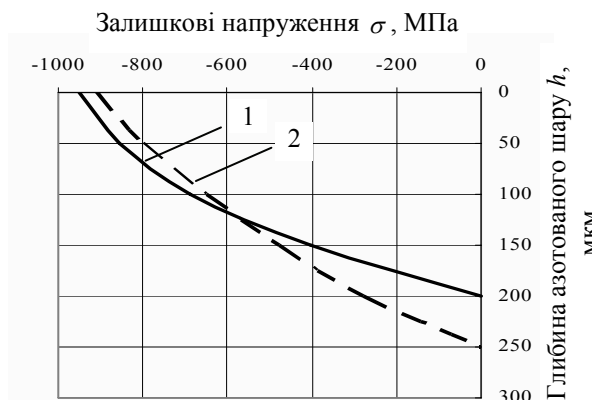


Рис. 1. Розподіл залишкових напружень по глибині азотованого шару зразків зі сталі 30ХГСА після імпульсного ГТЦ ІА з попередньою ТО (80%N₂ + 5%С₃Н₈; $p=200\text{Па}$; $t = 2,5$ год) 1 – $T = 400^\circ\text{C}$; 2 – $T = 600^\circ\text{C}$



Рис. 2. Розподіл залишкових напружень по глибині азотованого шару зразків зі сталі 30ХГСА після імпульсного ГТЦ ІА без попередньої ТО (80%N₂ + 5%С₃Н₈; $p=200\text{Па}$; $t = 2,5$ год) 1 – $T = 400^\circ\text{C}$; 2 – $T = 600^\circ\text{C}$

значень що при режимах з попередньою термообробкою напруження стиску поступово на глибині, де закінчується дифузійний шар. Режимам без попередньої термообробки притаманний інший варіант розподілу напружень по товщині зміцненого шару з максимумом величини напружень на деякій глибині. В обох випадках спостерігається тенденція щодо залежності глибини насичення азотом та величини залишкових напружень від температури технологічного процесу: при більших температурах товщина азотованого шару збільшується, а рівень залишкових напружень на поверхні деталі зменшується.

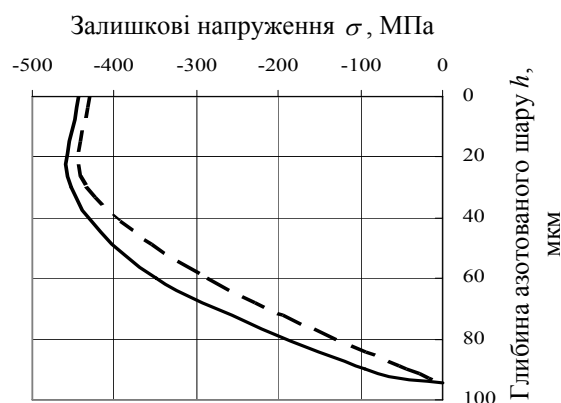


Рис. 3. Розподіл залишкових напружень по глибині азотованого шару зразків зі сталі 30ХГСА після азотування: 1 – $T = 540^\circ\text{C}$; 2 – $T = 580^\circ\text{C}$

Криві розподілу по глибині залишкових напружень у поверхневих шарах після газового азотування (рис. 3) мають проміжний вигляд між рис. 1 та 2, проте значення самих напружень є набагато нижчими.

Обирати той чи інший режим формування дифузійного шару слід з урахуванням реальних умов навантаження: якщо при терті кочення, коли позаду елемента, що котиться, створюються напруження розтягу, які сягають максимуму на деякій глибині, прийнятними є обидва види розподілу залишкових напружень і переваги одного з видів розподілу залежать

від рівня зовнішніх навантажень і типу руйнування (у приповерхневому шарі або на поверхні), то в умовах ковзання, особливо в інтенсивних режимах, необхідно, щоб на поверхні загальні напруження стиску, які є сумою експлуатаційних та залишкових напружень, не перевищували границю міцності матеріалу на стиск. За відносно невисоких значень питомого контактного навантаження усі розглянуті режими азотування є прийнятними з точки зору критеріїв міцності.

Проведені дослідження трибологічної поведінки сформованих зносостійких поверхневих шарів виявили, що характер залежностей інтенсивності зношування та коефіцієнта тертя від питомого навантаження за різних швидкостей ковзання та параметрів технологічного процесу у зміцнених ГТЦ ІА зразків (з попередньою термообробкою і без неї), у термооброблених зразків (без зміцнення ГТЦ ІА) та у зразків після традиційного газового азотування є подібним (рис. 4 та 5), проте із суттєвими відмінностями:

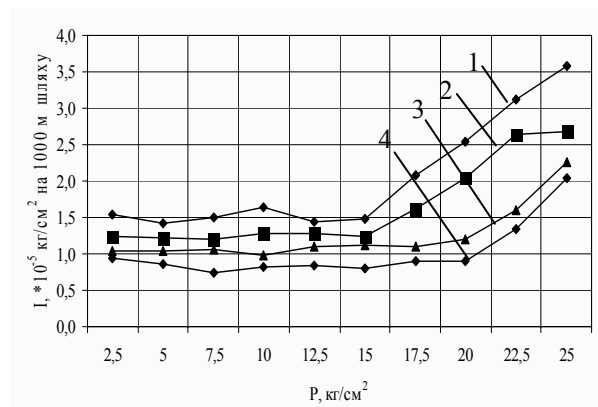


Рис. 4. Залежність інтенсивності зношування зразків від питомого навантаження P при швидкості ковзання $V = 1,0$ м/с: 1 – ТО; 2 – ТО + газове азотування; 3 – ГТЦ ІА (95%N₂ + 5%С₃Н₈; $T = 600^{\circ}\text{C}$; $p = 200$ Па; $t = 2,5$ год); 4 – ТО+ГТЦ ІА

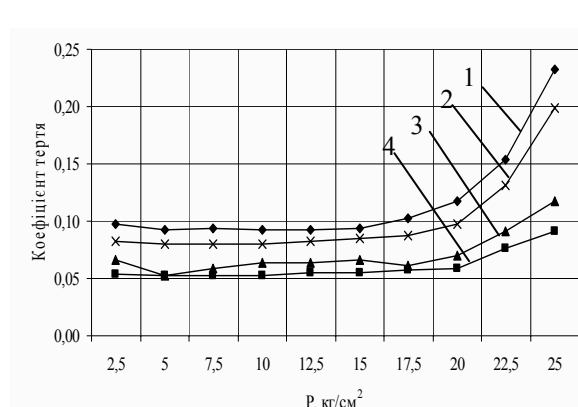


Рис. 5. Залежність коефіцієнту тертя зразків від питомого навантаження P при швидкості ковзання $V = 1,0$ м/с: 1 – ТО; 2 – ТО + газове азотування; 3 – ГТЦ ІА (95%N₂ + 5%С₃Н₈; $T = 600^{\circ}\text{C}$; $p = 200$ Па; $t = 2,5$ год); 4 – ТО+ГТЦ ІА

по-перше, підвищене зношування термооброблених зразків без зміцнення розпочинається при значеннях питомого навантаження порядку 13...14 МПа, у зміцнених газовим азотуванням – при 13...16 МПа, тоді як у зміцнених ГТЦ ІА – при 18...19 МПа. Таким чином, відбувається збільшення зони сталої зносостійкості, що призводить до розширення діапазону нормальної роботи деталей при підвищенні питомих навантажень;

по-друге, з аналізу кривих видно, що за однакових значеннях питомих навантажень та швидкостей ковзання інтенсивність зношування зміцнених ГТЦ ІА зразків за своїм абсолютним значенням у 1,7...2,1 а коефіцієнта тертя у 1,5...1,9 разів є меншими, ніж у термооброблених, і у 1,4...1,9 та 1,3...1,8 разів меншими, ніж у зразків, зміцнених газовим азотуванням. Попередня термообробка зразків перед зміцненням у більшості випадків підвищує їх зносостійкість.

Наступні дослідження показали (рис. 6...8), що зразки зі сталі 30ХГСА після зміцнення імпульсним ГТЦ ІА мають кращу зносостійкість при оптимальних значеннях залишкових напружень, які знаходяться у межах 650...850 МПа. Такі значення залишкові напруження мають на поверхні у зоні пружно-пластичної деформації (10...100 мкм), саме у якій і виникають максимальні напруження при терті;

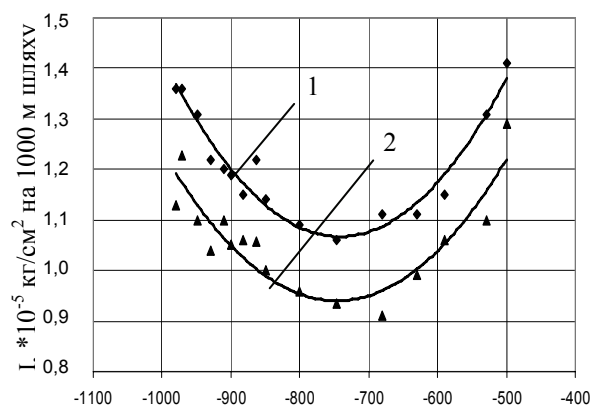


Рис. 6. Залежність інтенсивності зношування зразків, зміцнених імпульсним ГТЦ ІА з попередньою ТО, від залишкових напружень у поверхневому шарі при $V=0,4$ м/с: 1 – $p = 20$ МПа; 2 – $p = 10$ МПа

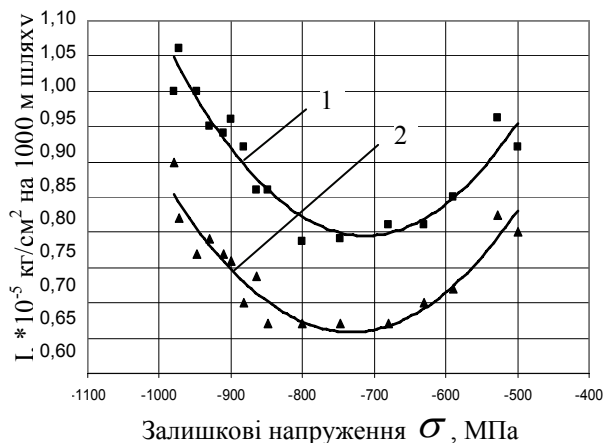


Рис. 7. Залежність інтенсивності зношування зразків, зміцнених імпульсним ГТЦ ІА з попередньою ТО, від залишкових напружень у поверхневому шарі при $p = 5$ МПа: 1 – $V = 1,0$ м/с; 2 – $V = 0,7$ м/с

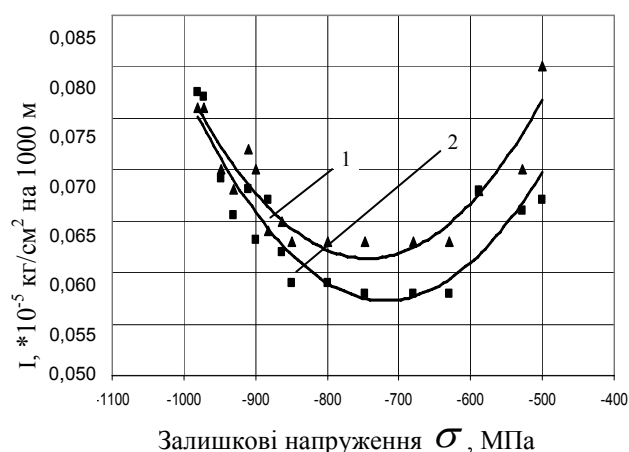


Рис. 8. Залежність коефіцієнта тертя зразків, зміцнених імпульсним ГТЦ ІА з попередньою ТО від залишкових напружень у поверхневому шарі при $V=0,4$ м/с: 1 – $p = 20$ МПа; 2 – $p = 10$ МПа

A_μ, B_μ, C_μ – коефіцієнти залежності коефіцієнта тертя $\mu(\sigma_{\text{зал}})$ зразків, зміцнених імпульсним ГТЦ ІА, від залишкових напружень у поверхневому шарі.

Наявність оптимального щодо зносостійкості діапазону залишкових напружень

Математично залежності інтенсивності зношування $I(\sigma_{\text{зал}})$ та коефіцієнта тертя $\mu(\sigma_{\text{зал}})$ зразків, зміцнених імпульсним ГТЦ ІА, від залишкових напружень у поверхневому шарі можуть бути апроксимовані рівняннями квадратичного тричлена:

$$I(\sigma_{\text{зал}}) = A_I (\sigma_{\text{зал}})^2 + B_I \sigma_{\text{зал}} + C_I,$$

$$\mu(\sigma_{\text{зал}}) = A_\mu (\sigma_{\text{зал}})^2 + B_\mu \sigma_{\text{зал}} + C_\mu,$$

де: $\sigma_{\text{зал}}$ – залишкові напруження на поверхні зміцнених сталевих зразків;

A_I, B_I, C_I – коефіцієнти залежності інтенсивності зношування $I(\sigma_{\text{зал}})$ зміцнених зразків від залишкових напружень у поверхневому шарі;

A_μ, B_μ, C_μ – коефіцієнти залежності коефіцієнта тертя $\mu(\sigma_{\text{зал}})$ зразків, зміцнених імпульсним ГТЦ ІА, від залишкових напружень у поверхневому шарі.

стиску можна пояснити тим, що напруження менші за 650 МПа, не компенсують напружень розтягу в матеріалі, які виникають у процесі тертя і призводять до підвищеного зношування, а більші за 850 МПа призводять до перевищення границі міцності матеріалу і його підвищеного зношування.

Висновки

Встановлено, що після зміцнення імпульсним ГТЦ ІА у поверхневих шарах деталей зі сталі 30ХГСА виникають залишкові напруження стиску, рівень і розподіл яких по глибині залежать від режимів іонноазотуючої обробки.

Виявлено існування у зміцнених шарах оптимального щодо зносостійкості діапазону залишкових напружень стиску, який знаходиться у межах 650...850 МПа. Таким чином, з'являється можливість за рахунок підбирання режимів імпульсного ГТЦ ІА досягати необхідних значень залишкових напружень та керувати, процесом формування зносостійких іонноазотованих шарів.

Показано, що залежності трибологічних характеристик іонноазотованої сталі 30ХГСА від залишкових напружень у поверхневому шарі можуть бути апроксимовані рівняннями квадратичного тричлена.

У подальшому перспективним вбачається дослідження впливу залишкових напружень в іонноазотованих шарах на декілька експлуатаційних властивостей, наприклад, на зносостійкість та опір втомі одночасно.

Список літератури

1. Пат. 10014 Україна, МПК (2006) C23C 8/06. Спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей іонно-плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді / Ляшенко Б. А., Рутковський А. В., Мірненко В. І, Радько О. В. ; заявник та патентовласник Національна академія оборони України. — № 19782 ; заявл. 19.09.06 ; опубл. 15.12.06, бюл. № 12.
2. Связь остаточных напряжений и предела выносливости упрочненных деталей различного диаметра / [В. Ф. Павлов, В. А. Кирпичёв, В. П. Сазанов и др.]: Проблемы динамики і міцності в газотурбобудуванні : тези доп. 3-ї Міжнар. наук.-техніч. конф., (Київ, 29—31 трав. 2007 р.) — К. : НАН України, Ін-т пробл. міцності, 2007. — С. 149—150.
3. Barrallier L. Residual stress analysis in nitrided layers. A comparison between the X-ray diffraction technique and a thin plate deflection method / Barrallier L., Barralis J., Frey J. // Bull. Cercle etud. metaux. — 1993. — Vol. 16, № 7. — P.4.1—4.12.
4. Впровадження технології підвищення питомої потужності автотракторних двигунів за рахунок застосування поршнів з теплозахисними покриттями, отриманими за допомогою енергозберігаючої технології вакуумного азотування в пульсуючому пучку плазми: Звіт про НДР (заключний) / Ін-т пробл. міцності НАН України. — Інв. № 00574. — К., 2006. — 159 с.
5. Пат. 24695 Україна МПК (2206) G01N3/56. Машина тертя / Скуратовський А. К. ; заявник та патентовласник Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". — № u 2007 02330 ; заявл. 03.03.2007 ; опубл. 10.07.2007, бюл. № 10.
6. Горелик С. С. Рентгенографический и электроннооптический анализ: учеб. пособие / Горелик С. С., Расторгуев Н. Н., Скаков Ю. А. — [3-е изд.]. — М. : МИСИС, 1994 — 328 с.
7. Васильев Д. М. Современное состояние рентгенографического способа определения макронапряжений / Д. М. Васильев, Б. Б. Трофимов // Заводская лаборатория. — К. : Машиностроение, 1984 — № 7. — С.20—29.